

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ «ОТВАЛ – ОСНОВАНИЕ»

С. П. Бахаева, Е. В. Ананенко✉

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

✉ ananenko_ev@mail.ru

Аннотация: В условиях высокой стоимости аренды земельных участков и ограничения их площади под размещение отвалов вскрышных пород выделяются участки рельефа, неблагоприятные по условиям устойчивости, что повышает риск развития деформаций и нарушения устойчивости отвалов. Методами системного анализа, анализа риска, а также на основании результатов инструментальных маркшейдерских наблюдений установлены возможные сценарии развития деформаций и их вероятности, а также схемы деформирования насыпного массива. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформируемого состояния различных типов отвалов с целью выявления наиболее уязвимых участков, на которых в первую очередь появляются признаки деформаций. Выявлено, что схемы и механизм деформирования природно-технических систем определяются морфологией естественного и техногенного рельефа земной поверхности. С учетом схем и механизма деформирования природно-технических систем, а также экспериментальных данных, полученных по результатам маркшейдерских наблюдений, разработаны конструкции наблюдательных станций, предусматривающие расположение рабочих реперов в наиболее слабых местах, что позволяет обнаруживать деформации отвалов на ранней стадии и своевременно принять меры по предупреждению оползней. Результаты исследований могут быть полезными при обосновании наиболее опасных по условию устойчивости участков, на которых рекомендуется закреплять рабочие реперы наблюдательной станции для геомеханического мониторинга внешних и внутренних отвалов, а также насыпных грунтовых сооружений.

Ключевые слова: мониторинг безопасности, природно-техническая система «отвал – основание», типизация отвалов, схемы деформирования, конструкция наблюдательной станции, рабочий репер

Благодарность: Авторы выражают признательность Елене Владимировне Разумовской, старшему специалисту по учебно-методической работе КузГТУ, за помощь в переводе отдельных фрагментов статьи на английский язык.

Для цитирования: Бахаева С. П., Ананенко Е. В. Мониторинг природно-технических систем «отвал – основание». *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):67–76. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_67_76.

THE MONITORING OF THE NATURAL-AND-TECHNICAL SYSTEMS 'DUMP-FOUNDATION'

S. P. Bakhaeva, E. V. Ananenko✉

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉ ananenko_ev@mail.ru

Abstract: In conditions of high cost of the land plots lease and restriction of their areas for overburden dumps placement, there are relief areas unfavorable, in terms of stability conditions, allocated, that increases the risk of deformations and violations of the stability of the dumps. By methods of the system analysis, risk analysis, as well as based on the results of the instrumental surveying monitoring, possible scenarios for development of the deformations and their probabilities, along with the scheme of deformation of the piled-up mass, have been established. In the article there are the results of experimental studies of the stress-strain state of the various types of dumps in order to detect the most vulnerable areas, where signs of deformations appear in the first place. It is figured out that schemes and mechanism of deformation of the natural and technical systems are determined by morphology of the natural and man-made relief of the earth's surface. Taking into account schemes and mechanism of the NTS deformation, as well as experimental data obtained from the results of surveying monitoring, the design of the observation station has been developed, providing for the location of the benchmark rods in the weakest places, that makes it possible to detect deformations of dumps at an early stage and timely take measures to prevent landslides. The results of the research can be useful in substantiating the most hazardous sites as per the condition of stability, where it is recommended to fix bench mark rods of the observation station for geo-mechanical monitoring of the external and internal dumps, as well as bulk soil structures.

Keywords: safety monitoring, natural-and-technical system (NTS) of 'dump-foundation', NTS typification, deformation schemes, design of the observation station, benchmark rod

Gratitude: The authors express their appreciation to Yelena V. Razumovskaya, academic administrative assistant, KuzSTU, for translation of some parts of the article into English.

For citation: Bakhaeva S. P., Ananenko E. V. The monitoring of the natural-and-technical systems «dump-foundation». *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):67-76. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_67_76.

Введение

Опыт эксплуатации, а также мониторинг отвалов вскрышных пород указывают на участвовавшие случаи нарушения устойчивости этих сооружений [1]. При этом есть многочисленные примеры, где ярусы отвала высотой до 90 м, расположенные на наклонном (до 12 градусов) основании, не имеют признаков деформаций и отвалы с высотой всего около 33 м на пологом (до 5 градусов) основании подвержены циклическим оползням (рис. 1).

По исследованиям ряда ученых и специалистов [3, 4], а также по нашим исследованиям [2], характеристики основания оказывают большее влияние на устойчивость отвала, чем отвальная масса вскрышных пород. Поэтому при оценке устойчивости отвалов следует рассматривать напряженно-деформированное состояние природно-технической системы (ПТС) «отвал – основание». В этой связи актуальна задача по установлению схемы деформирования ПТС «отвал – основание», так как от этого зависят виды мониторинга [5–7], организация процедуры контроля, а также оценка состояния ПТС «отвал – основание».

Для того чтобы рассмотреть все возможные варианты ПТС «отвал – основание» и оценить условия, при которых существует высокий риск развития деформаций и нарушения устойчивости в качестве научного метода, позволяющего выполнить структуризацию ПТС «отвал – основание», воспользуемся методом системного анализа. Идея метода системного анализа заключается в расчленении сложной проблемы на подпроблемы, этапы до определенного уровня, используя признаки структуризации, т. е. построение иерархической структуры, упрощающей процедуру анализа сложной проблемы.

В нашем случае будем говорить о применении метода системного анализа для типизации природно-технической системы «отвал – основание» по условиям формирования, влияющим на устойчивость отвального массива и конструкцию наблюдательной станции, позволяющей обнаружить деформации на стадии их зарождения.

Минимизация временных и людских ресурсов на проведение инструментальных наблюдений за состоянием природно-технической системы «отвал – основание» обе-

спечивается за счет выявления для каждой подобной ПТС наиболее опасных участков с позиции устойчивости и организации мониторинга на ранней стадии появления признаков деформаций.

Цель исследований

Выявление наиболее уязвимых участков, на которых в первую очередь появляются признаки деформаций, для закрепления рабочих реперов наблюдательной станции, что позволит увеличить эффективность геомеханического мониторинга отвалов при минимизации трудозатрат на его реализацию.

Материал и методы исследований

Для реализации поставленной цели использовались научные методы исследований: системный анализ для типизации ПТС «отвал – основание» по условиям формирования, влияющим на устойчивость; «анализ дерева событий» (Event Tree Analysis – ETA) для оценки риска развития деформаций, установления возможных сценариев и вероятности их развития; моделирование схем деформирования природно-технических систем с учетом морфологии естественного и техногенного рельефа земной поверхности, а также результаты личных инструментальных наблюдений за деформациями ряда отвалов с использованием высокоточных геодезических инструментов Topcon GR-5 и Leica GS14.

Типизация природно-технических систем отвал – основание.

Рассмотрим построение отдельных уровней иерархической схемы типизации ПТС «отвал – основание» по условиям формирования, влияющим на устойчивость.

Приняв за нулевой уровень главную цель – управление устойчивостью ПТС «отвал – основание», декомпозируем ее на три вида отвальной массы (первый уровень иерархической схемы):

I – скальные и полускальные породы;

II – смесь песчано-глинистых и скальных пород;

III – песчано-глинистые породы, прочностные характеристики которых определяют положение поверхности скольжения в отвальном массиве.

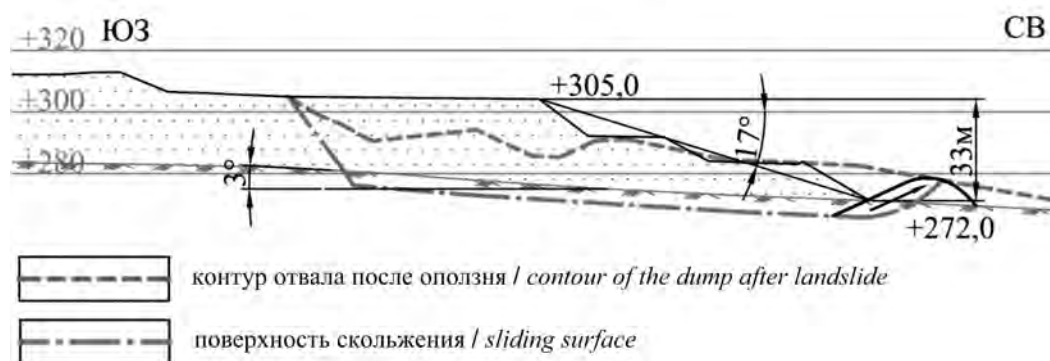


Рис. 1. Деформация природно-технической системы «отвал – основание» высотой 33 м /

Fig. 1. Deformation of the NTS 'dump-foundation' of 33 m height

В свою очередь для каждого вида отвальной массы следует выделить четыре группы по типу пород основания (второй уровень иерархической схемы), сопротивление сдвигу которых способствует удержанию гравитационных сил либо увеличению тангенциальных сил, приводящих к смещению отвальной массы, и определяют положение поверхности скольжения по слабому контакту или слабому основанию отвала:

А. Прочное основание (скальные, полускальные и песчано-гравийные породы, сопротивление сдвигу которых не ниже, чем у отвальной массы)

Б. Слабое основание (слой, мощностью более 2 м, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы).

В. Слабый контакт (слой, мощностью не более 2 м, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы).

Г. Земная поверхность, подработанная подземными горными работами.

Опыт формирования отвалов и исследование причин их деформаций показали, что отвалы, расположенные на наклонном основании, когда угол внутреннего трения основания φ' больше угла его наклона β , сохраняют устойчивость при большой высоте.

Под влиянием внешних нагрузок и воздействий сопротивление сдвигу пород основания в процессе эксплуатации ПТС уменьшается. В этом случае при достижении условия $\varphi' \leq \beta$ априори без разработки противодеформационных мероприятий устойчивость отвала не будет обеспечена. Вследствие этого при типизации ПТС «отвал – основание» (третий уровень иерархической схемы) следует выделить два условия: угол внутреннего трения пород основания φ' больше (1) либо меньше (2) угла его наклона β .

В свою очередь характеристики пород основания отвалов подвержены воздействию группы факторов (четвертый уровень иерархической схемы), оказывающих как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивость, – это морфология естественного (с – склон или л – лог) и техногенного (мульда сдвижения при подработке поверхности подземными горными работами [8]) рельефа земной поверхности.

Иерархическая схема типизации ПТС «отвал – основание» (рис. 2), построенная методом системного анализа, отражает 42 варианта возможных сочетаний условий, определяющих состояние отвала вскрышных пород в части его устойчивости. Логический анализ иерархической схемы позволяет перейти к вероятным схемам деформирования ПТС «отвал – основание» для установления сценариев развития деформаций и их вероятностей.

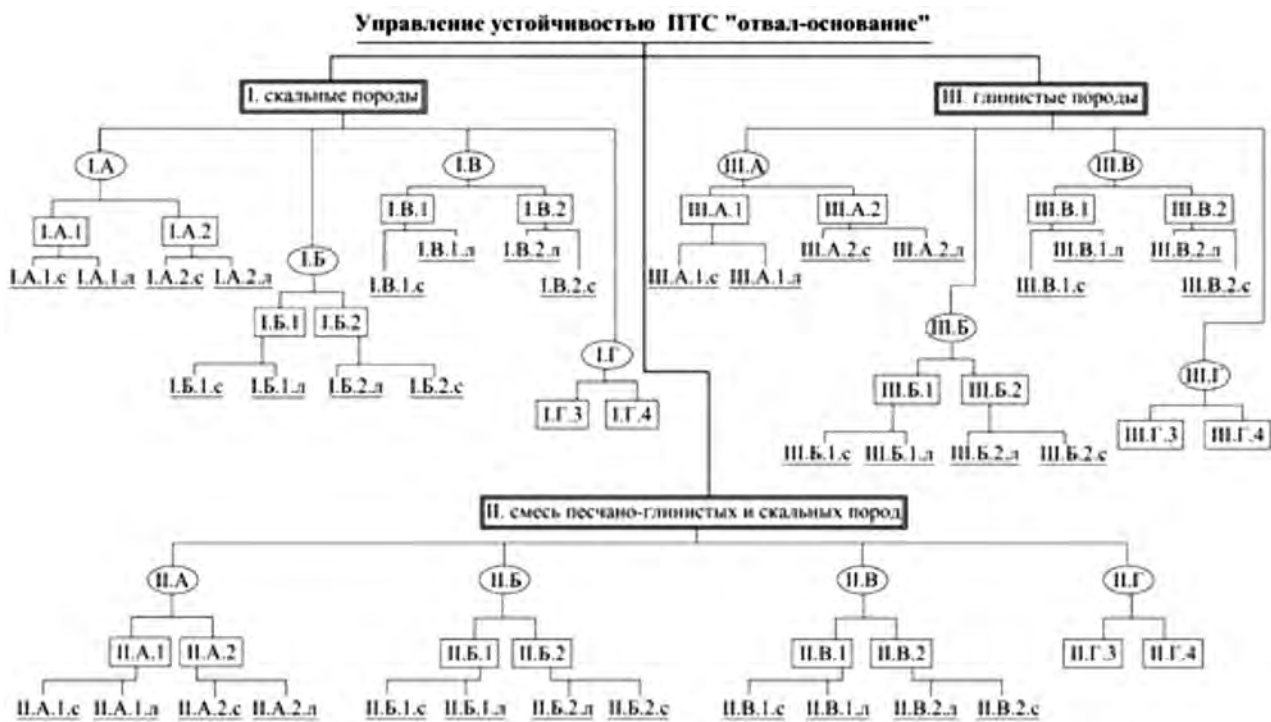


Рис. 2. Иерархическая схема типизации природно-технической системы «отвал – основание» по условиям формирования, влияющая на устойчивость.

Условные обозначения:

Тип отвальной массы: I – скальные породы; II – смесь песчано-глинистых и скальных пород; III – песчано-глинистые породы.

Тип основания отвала: А – прочное; Б – слабое; В – слабый контакт; Г – подработанная земная поверхность.

Соотношение угла наклона β основания отвала и сопротивления сдвигу по подошве отвала φ' : 1 – $\varphi' > \beta$; 2 – $\varphi' \leq \beta$.

Направление откоса отвала относительно вектора максимального оседания $\eta_{\max}$ мульды сдвижения: 3 – не совпадает с $\eta_{\max}$; 4 – совпадает с $\eta_{\max}$.

По морфологии рельефа основания: с – склон; л – лог /

Fig. 2. Hierarchical scheme of the typification of the natural-and-technical system 'dump-foundation' as per the formation conditions, affecting stability.

Legend to the typification of the natural-and-technical system 'dump-foundation':

Type of dump mass: I – rock mass; II – mixture of sandy-and-clay and rocks; III – sandy and clay rock.

Type of dump foundation: A – solid; B – weak; C – weak contact; D – undermining surface.

Ratio of the inclination angle β of the dump foundation and shear resistance along the bottom of the dump φ' : 1 – $\varphi' > \beta$; 2 – $\varphi' \leq \beta$.

Direction of the slope dump relative to the vector of maximum subsidence $\eta_{\max}$ of the shift through: 3 – does not match with $\eta_{\max}$; 4 – matches with $\eta_{\max}$.

As per the morphology of the foundation relief: c – slope; l – wet valley.

**Схемы деформирования природно-технической системы
«отвал — основание»
и конструкций наблюдательных станций**

Для установления возможных сценариев развития деформаций и их вероятности воспользуемся методом «Анализ дерева событий» (Event Tree Analysis — ETA).

«Анализ дерева событий» — количественный (полуколичественный) метод, включающий построение последовательности событий, исходящих из начального. Например, оползнию отвала предшествует начальное событие — мелкие (до 10 см) продольные трещины на поверхности отвала. Частота каждого события при развитии деформации ПТС «отвал — основание» рассчитывается последовательным умножением частоты предыдущего события на вероятность каждого последующего до конечного события [9]. В итоге устанавливают возможные сценарии развития деформаций ПТС «отвал — основание» и их вероятности (рис. 3).

Интеграцией типизации ПТС «отвал — основание» и результатов «анализа дерева событий» установлено, что в зависимости от природных и техногенных условий формирования отвалов развитие деформации ПТС «отвал — основание» может произойти по одной из шести схем [10] (рис. 4).

Схема 1: механизм деформирования в виде **просадки в результате уплотнения** отвальных пород характерен для всех типов (I, II, III) отвальных пород при отсыпке на прочное основание (А) и слабый контакт (В) и при расположении отвала на подработанной территории, когда направление откоса отвала не совпадает (3) с направлением вектора максимального оседания мульды сдвижения (рис. 4а).

В результате уплотнения отвальных пород происходит просадка горизонтальных площадок, величина просадки

в зависимости от гранулометрического состава отвальной массы, ее мощности и условий формирования составляет 7–10 % от высоты отвала. Одновременно происходит выполаживание откоса на 4–6° до устойчивого угла в зависимости от времени стояния откоса без обновления [11].

Схема 2: механизм деформирования **вращательный сдвиг** (криволинейная поверхность скольжения формируется полностью в породах нарушенного сложения тела отвала, большей частью по контакту слабых и прочных отвальных пород) характерен для песчано-глинистых (III) и смеси песчано-глинистых и скальных пород (II), при отсыпке на прочное основание (А) и слабый контакт (В), когда сопротивление сдвигу по подошве отвала φ' больше угла наклона основания отвала (1). Деформации по схеме 2 (рис. 4б) относятся к оползням надподошвенного типа, характерным для отвалов, сложенных слабыми увлажненными породами, при переслаивании сухих и влажных, слабых и прочных пород, а также при наличии в теле отвала захороненного снега [12, 13]. Активизация смещений здесь происходит в период снеготаяния и ливневых дождей.

Обычно деформации ПТС «отвал — основание» по **схемам 1 и 2** (см. рис. 4а и 4б) не создают серьезных негативных последствий для окружающей среды. Происходит закономерный процесс уплотнения и выполаживания откосов. Поэтому при этих схемах деформирования ПТС «отвал — основание» достаточно вести визуальный контроль или съемку беспилотной авиационной системой (БАС) поверхности приоткосной части отвала [14]. Однако в случае увеличения амплитуды раскрытия трещин, появления трещин криволинейного очертания с замыканием на откос работы по формированию отвалов нужно остановить и организовать инструментальные наблюдения. Реперы наблюдательной станции в



Рис. 3. «Дерево событий» развития деформации природно-технической системы «отвал — основание» /
Fig. 3. «Event Tree Analysis» of the deformation development of the natural-and-technical system 'dump-foundation'

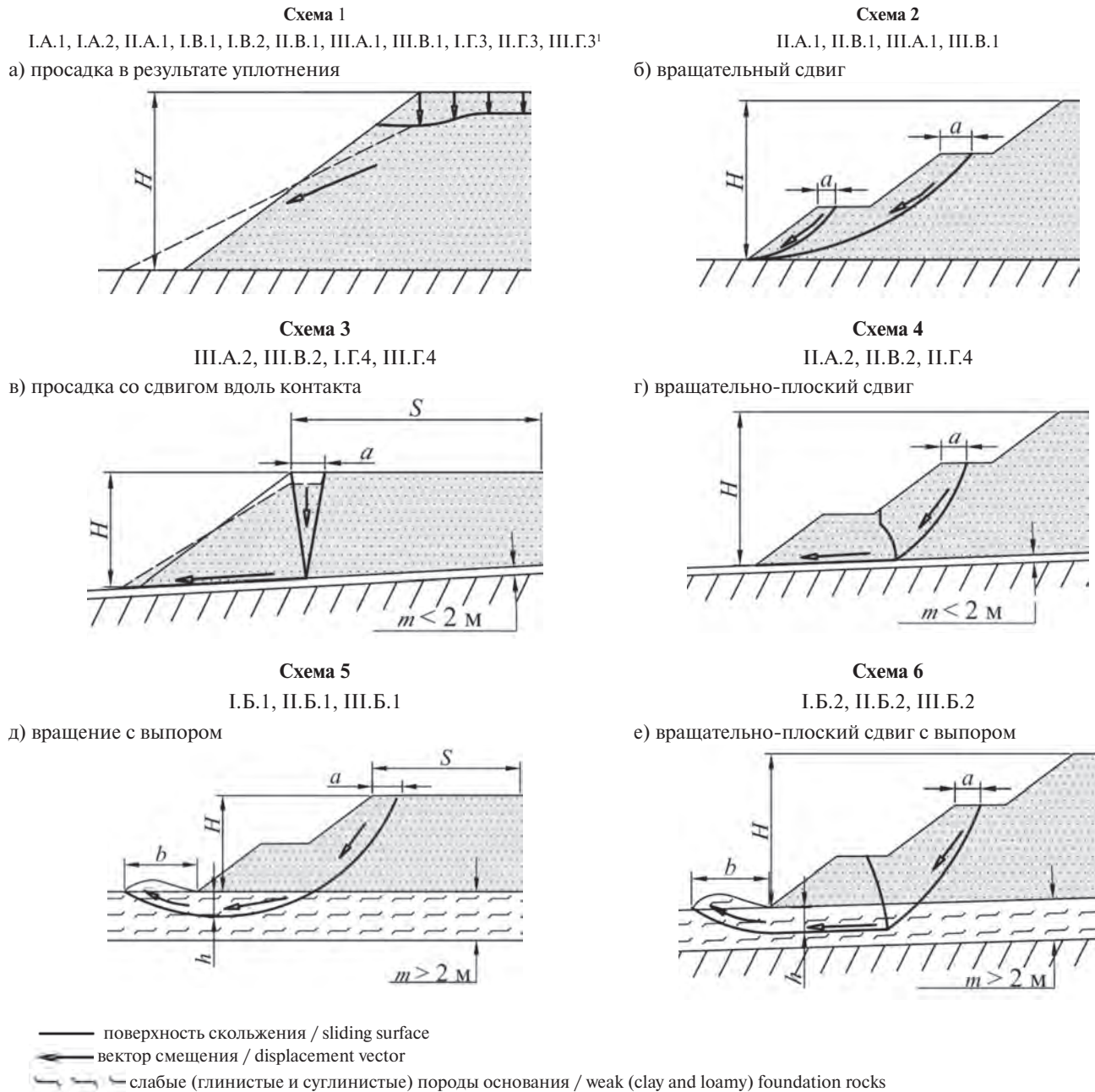


Рис. 4. Механизм и схемы деформирования природно-технической системы «отвал – основание»: а – просадка в результате уплотнения; б – вращательный сдвиг; в – просадка со сдвигом вдоль контакта; г – вращательно-плоский сдвиг; д – вращение с выпором; е – вращательно-плоский сдвиг с выпором

Условные обозначения:

b – ширина вала выпирания; H – высота отвала; ε – угол между направлением наибольшего главного напряжения и площадкой скольжения; a – ширина призмы возможного обрушения; S – зона сдвижения; h – глубина погружения поверхности скольжения в слабый слой; φ – угол внутреннего трения пород.

Расчетные формулы для схем деформирования 2, 3 и 4 / Calculation formulas for deformation schemes 2, 3 and 4 $a = (0,3 - 0,8) H$; $S = 2H$.

Расчетные формулы для схем деформирования 5 и 6 / Calculation formulas for deformation schemes 5 and 6

$$a = (0,3 - 0,8) (H + h); b = 2h \operatorname{ctg} \varepsilon; S = 2(H + h); \varepsilon = 45^\circ - \varphi / 2.$$

Fig. 4. Mechanism and diagrams of deformation of the natural-and-technical system dump – foundation:

a – subsidence die to compaction; b – rotary shear; c – subsidence with a shear along the contact;

d – rotary-flat shear; e – rotation with uplift; f – rotary flat shear with uplift

Legend:

a – prism width of a possible collapse; S – displacement zone; h – submersion depth of the sliding surface into weak layer; φ – angle of rocks' internal friction; b – bulge shaft width; H – dump height; ε – angle between the direction of the greatest major stress and the sliding platform.

¹(Индексы по признакам типизации ПТС «отвал – основание», приведенной на иерархической схеме (рис. 2)).

этом случае следует закладывать в пределах призмы возможного обрушения вдоль верхней бровки отвала или яруса, где появились трещины.

Схема 3: механизм деформирования в виде **просадки со сдвигом вдоль контакта** (в верхней части происходит просадка отвальной массы в пределах призмы возможного обрушения, в последующем призма обрушения отрывается от основного массива и смещается по слабому контакту «отвал — основание») характерен для песчано-глинистых пород (III) при отсыпке на прочное основание (А) или слабый контакт (В), а также для отвалов скальных (I) и песчано-глинистых пород (III) при размещении на подработанной территории (Г), когда направление откоса отвала совпадает с направлением вектора максимального оседания (4) мульды сдвижения (рис. 4в).

Схема 4: механизм деформирования **вращательно-плоский сдвиг** (в верхней части поверхность скольжения проходит в теле отвала по контакту слабых и прочных отвальных пород, в нижней — по слабому контакту «отвал — основание») характерен для смеси песчано-глинистых и скальных пород (II) при отсыпке на прочное основание (А) или слабый контакт (В), при размещении на подработанной территории (Г), когда направление откоса отвала совпадает (4) с направлением вектора максимального оседания мульды сдвижения (рис. 4г).

Деформации по схемам 3 и 4 относятся к оползням подошвенного (контактного) типа. Контактные оползни — наиболее распространенный вид деформаций и приводит к серьезным последствиям, так как смещение отвального массива может происходить до тех пор, пока он упрется в преграду (например, рельеф основания будет иметь обратный уклон). Такие оползни возникают при размещении отвала на наклонном слоистом основании (В), при наклоне основания согласно с откосом, когда сопротивление сдвигу по подошве отвала φ' под воздействием негативных факторов становится меньше угла его наклона β (2). За счет сил гравитации от

верхних ярусов по контакту со слоистым основанием первым начинает смещаться нижний ярус, затем второй, и так последовательно происходит сдвиг всего отвала. При потенциальной возможности деформирования ПТС «отвал — основание» по схемам 3 и 4 необходимо организовать мониторинг с начала формирования отвалов.

Основываясь на механизме смещения ПТС «отвал — основание» и опыте ведения мониторинга [15, 16], нами разработана конструкция наблюдательной станции НС-I для схем деформирования 3 и 4 (рис. 4в и 4г).

Рабочие реперы наблюдательной станции НС-I нужно закладывать на двух нижних ярусах отвала вдоль верхней бровки в пределах призмы возможного обрушения (рис. 5), что позволит на ранней стадии обнаружить начало оползневых процессов.

Смещения, возникающие на нижнем ярусе отвала (реперы R^1_1, R^2_1, R^3_1), могут свидетельствовать о деформации как яруса, так и отвала в целом. Поэтому необходимо заложить профильную линию наблюдательной станции на втором ярусе. Появление смещений в плане по реперам R^1_2, R^2_2, R^3_2 указывает на деформацию сдвига всего отвального массива.

Схема 5: механизм деформирования — вращение с выпором (плавная криволинейная поверхность скольжения в верхней части проходит в теле отвала по контакту слабых и прочных отвальных пород, в нижней — в слабых породах основания большой мощности) характерен для всех типов пород (I, II, III) при отсыпке на слабое горизонтальное основание (Б) большой мощности, когда сопротивления сдвигу по подошве отвала φ' больше угла наклона β (1) основания (рис. 4д).

Схема 6: механизм деформирования — вращательно-плоский сдвиг с выпором (плавная криволинейная поверхность скольжения в верхней части проходит в теле отвала по контакту слабых и прочных отвальных пород, в нижней — в слабых породах основания большой мощности со сдвигом вдоль подошвы) характерен для всех типов пород (I, II, III) при от-

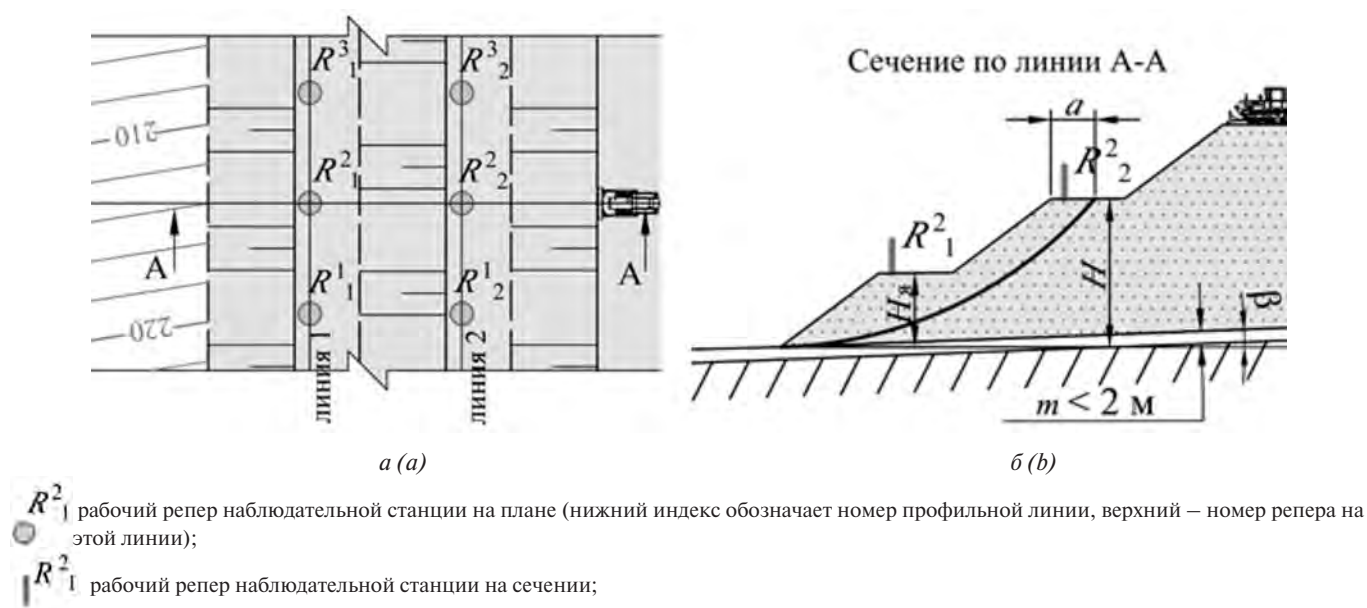


Рис. 5. Конструкция наблюдательной станции НС-I: а — план; б — сечение по линии А-А

Условные обозначения:

a — ширина призмы возможного обрушения; $H_я$ — высота яруса; H — высота элемента отвала;
 m — мощность слабого слоя; β — угол наклона основания отвала /

Fig. 5. Design of the observation station НС-I:
 a — design; b — cross section along the line А-А.

сыпке на наклонное основание, сложенное слабыми породами (Б) большой мощности, когда сопротивление сдвигу по контакту с основанием φ' меньше угла наклона β (2) основания (рис. 4е).

Деформации по схемам **5** и **6** относятся к оползням подпошвенного типа, являются наибольшими по объему и последствиям по сравнению с надпошвенными и пошвенными оползнями. В этом случае слабые породы основания под действием гравитационных сил отвальной массы пород выдавливаются перед нижней бровкой в виде вала «выпирания» [17]. Как показывают наблюдения, для подпошвенных оползней характерна различная по продолжительности скрытая стадия деформаций, когда отвальная масса пород погружается в слабые породы основания. Деформация может проявляться неожиданно без предварительных внешних проявлений (отсутствие на поверхности отвала трещин, заколов). Поэтому мониторинг таких деформаций необходимо начинать от начала формирования отвала, при этом основное внимание акцентировать на подошву отвала вдоль нижней бровки нижнего яруса, так как первым признаком начала деформаций является появление вала «выпирания».

Для обеспечения геомеханического мониторинга состояния ПТС «отвал — основание», деформирующихся по схемам **5 и 6**, нами разработана конструкция наблюдательной станции **НС-II**, которая прошла апробацию в реальных условиях.

Наблюдательная станция **НС-II** должна включать не меньше трех профильных линий (рис. 6): одну (линия 1) – вдоль тальвега лога, где породы основания обводнены, вторую (линия 2) – на берме вдоль нижнего (первого) яруса отвала, третью (линия 3) – на берме вдоль второго яруса. По профильной линии 1 реперы нужно закладывать в основании, за границей отвала для наблюдения за движением пород в области вероятного появления языка вала выпирания.

Для установления границы деформаций на профильных линиях 2 и 3 через 20–50 м (на пологих склонах) требуется закладывать по два репера на каждом ярусе отвала параллельно

реперам линии 1 со стороны склонов. При крутых склонах реперы R^3 , R^2 , R^1_3 и R^1_2 нужно также закладывать реперы на линии водораздела.

Для реперов R_1^3 и R_1^4 характерно смещение сначала вертикально вниз, затем горизонтально в сторону откоса, для репера R_1^2 — смещение в вертикальной плоскости окажется со знаком +, что характерно при образовании вала выпирания. Векторы смещения реперов R_2^3 , R_2^2 , R_1^3 и R_1^2 направлены в сторону тальвега лога.

Наши рассуждения относительно конструкций наблюдательной станции основаны на экспериментальных наблюдениях за несколькими объектами, в частности конструкция наблюдательной станции для оползня подподошвенного типа (схема 5) внешнего отвала разреза «З» приведена на рисунке 7.

Экспериментальные данные мониторинга ПТС

«отвал — основание»

В отвал разреза «3» складировалась отвальная масса песчано-глинистых и скальных пород (тип отвальной массы – **II**). Основанием отвала являлся естественный рельеф земной поверхности, сложенный суглинками и глинами различной консистенции (**Б**). Угол наклона основания ($\alpha = 5$) – близкий к сопротивлению сдвигу по контакту ($\beta = 6$). Основание отвала представлено двумя глубокими оврагами. Индекс ПТС «отвал – основание» по условиям формирования – **II. Б. 1. л** (рис. 7).

Наиболее вероятная схема деформирования ПТС «отвал – основание» – **5** (вращение с выпором).

В апреле 2015 года на отвале произошел оползень подподошвенного типа. В мае с целью оценки возможности использования оставшейся недеформированной части отвала для последующего складирования вскрышной породы была заложена маркшейдерская наблюдательная станция (рис. 7).

– по логу (профильная линия 2: реперы 2-2, 2-3, 2-5, 2-6, 2-8, 2-10; скв. 3);

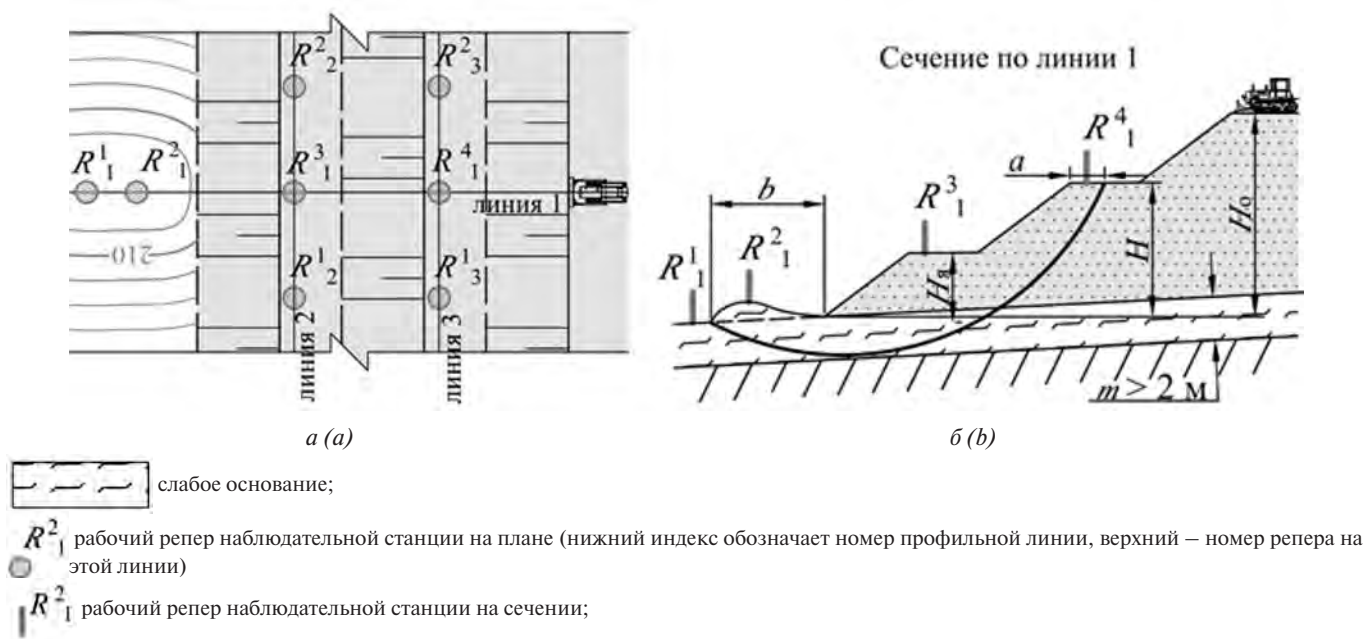
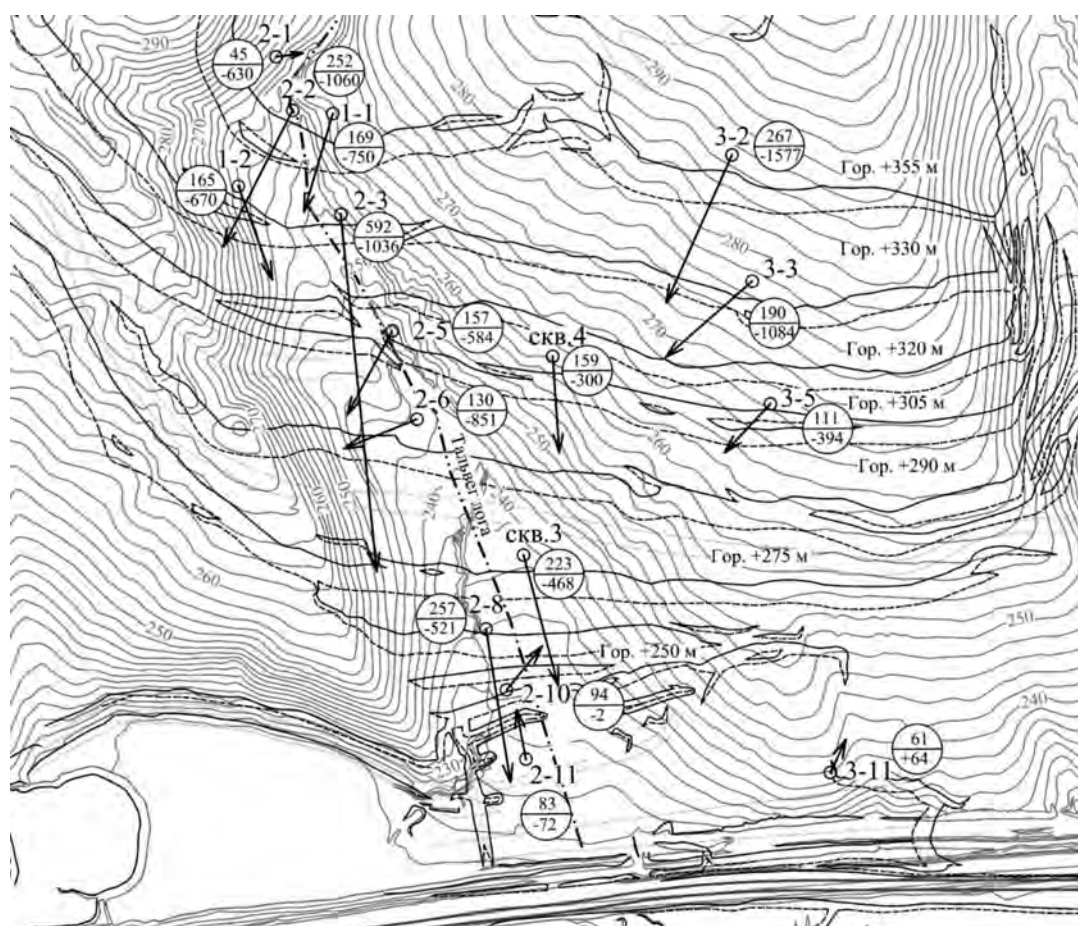


Рис. 6. Конструкция наблюдательной станции **НС-II**: а – план; б – сечение по линии 1

Условные обозначения:

a – ширина призмы возможного обрушения; b – ширина вала выпирания; $H_{\text{я}}$ – высота яруса;
 H – высота элемента отвала; $H_{\text{н}}$ – высота отвала /

Fig. 6. Design of the observation station **HC-II**: a – design; b – cross section along the line A-A.



Условные обозначения:

- фактическое положение отвала / actual position of the bump
- суммарное смещение репера за период: май 2015 – ноябрь 2017 г. (в числителе – плановое; в знаменателе – высотное) / total displacement of the benchmark for the period: May 2015 – November 2017 (in the numerator – planned; in the denominator – altitude)
- тальвег лога / valley bottom
- изолинии рельефа основания отвала / contour lines of the dump base relief
- рабочий репер наблюдательной станции и направление вектора смещения в плане за период: май 2015 – ноябрь 2017 г. (первая цифра – номер профиля, вторая – номер репера) / benchmark rod of the observation station and the direction of the displacement vector in the design for the period: May 2015 – November 2017 (the first digit is the profile number, the second is the reference number)

Рис. 7. Векторы смещения рабочих реперов на плане внешнего отвала разреза «3» /
Fig. 7. Displacement vectors of the benchmark rods on the layout of the external bump of the section Z

– на склонах (профильная линия 3, реперы: 3-2, 3-3, 3-5; профильная линия 1, реперы 1-1 и 1-2 и профильная линия 2: репер 2-1; скв. 4);

– в основании отвала (2-11, 3-11).

Анализ пространственно-временного изменения состояния ПТС «отвал – основание» по результатам инструментальных наблюдений позволил установить схему и механизм, а также динамику развития деформации: первоначально были зафиксированы смещения вверх и в сторону откоса по реперам 2-11 и 3-11, расположенным у подошвы отвала, что привело к формированию вала выпирания в нижней части отвала. Через месяц началось смещение отвальной массы вдоль тальвега лога (векторы реперов: 2-3, 2-8, скв. 3), в последнюю очередь пришли в активное движение реперы (2-1, 3-2, 3-3, 3-5, 1-2, 1-1, скв. 4), установленные на склонах. Векторы этих реперов были ориентированы в сторону таль-

вега и достигли максимальных величин в плане и по высоте (по реперам 3-2 и 3-3 оседания составили 1 577 и 1 084 мм, горизонтальные векторы смещений – 267 и 190 мм соответственно).

Выводы

1. Теоретическими и экспериментальными исследованиями, выполненными авторами с использованием высокоточных инструментов Topcon GR-5 и Leica GS14, установлены наиболее уязвимые участки для ПТС «отвал – основание»: характерно проявление начальных признаков деформаций у подошвы отвала – стадия управляемых деформаций. Своевременная разработка противоползневых мероприятий позволяет предотвратить негативные последствия.

2. Наиболее активно с максимальными величинами в плане и по высоте отвальная масса смещается со склонов

в сторону тальвега лога — стадия неуправляемых деформаций, когда происходит нарушение устойчивости откосов отвалов.

3. Уменьшение вероятности нарушения устойчивости откосов отвалов и снижение тяжести его последствий обеспечивается ведением инструментальных наблюдений от начала формирования отвалов с использованием конструкции наблюдательной станции, соответствующей наиболее веро-

ятному механизму и схеме деформирования природно-технической системы «отвал — основание».

4. Результаты исследований могут быть полезными при обосновании наиболее опасных по условию устойчивости участков, на которых рекомендуется закреплять рабочие реперы наблюдательной станции для геомеханического мониторинга внешних и внутренних отвалов и комплексной оценки состояния этих сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ananenko, E. The reason analysis of the overburden rock dumps deformation / E. Ananenko, S. P. Bakhaeva // E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium. — Kemerovo: EDP Sciences. — 2021. — Vol. 315. — P. 01001. — DOI: 10.1051/e3sconf/202131501001.
2. Ананенко, Е. В. Оценка влияния нагрузок и воздействий на напряженно-деформированное состояние природно-технических систем «отвал — основание» / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № 10. — С. 5–21. — DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_5.
3. Ческидов, В. И. Особенности внутреннего отвалообразования вскрышных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых / В. И. Ческидов, А. В. Резник // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 2. — С. 61–68.
4. Шпаков, П. С. Устойчивость отвалов на месторождении «Эльдорадо» / П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 6. — С. 69–79. — DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-69-79.
5. Рыбин, В. В. Структура комплексной системы мониторинга устойчивости объектов открытых горных работ с применением цифровых технологий / В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, О. В. Наговицын // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 4. — С. 70–77. — DOI: 10.15372/FTPRI20210407.
6. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, М. Р. Пономаренко, Ю. Ю. Кутепов // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 69–74. — DOI: 10.17580/gzh.2023.05.10.
7. Организация комплексного мониторинга устойчивости внешних отвалов, сложенных породами с низкой несущей способностью, на слабом основании в условиях ПАО «Михайловский ГОК» / С. И. Кретов, Р. И. Исмагилов, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. — 2019. — № 3 (145). — С. 15–19. — DOI: 10.30686/1609-9192-2019-3-145-15-19.
8. Kashnikov, Y. A. Radar interferometry-based determination of ground surface subsidence under mineral mining. / Y. A. Kashnikov, V. V. Musikhin, I. A. Lyskov // Journal of Mining Science. — 2012. — Vol. 48. — P. 649–655. — DOI: 10.1134/S1062739148040089.
9. Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: руководство по безопасности. — М., 2022. — 84 с.
10. Открытые горные работы: справочник / К. Н. Трубецкой [и др.]. — М.: Горное бюро, 1994. — 590 с.
11. Демин, А. М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. — М.: Недра, 1973. — 232 с.
12. Characteristics and mechanism of dump landslides under compound loads based on physical model test / C. Cao, J. Feng, Z. Zhang [et al.] // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2022. — Vol. 81. — P. 350. — DOI: 10.1007/s10064-022-02825-6.
13. Cao, Ch. Triggering mechanism and dynamic process of water-rock flow in Nanfen waste dump in 2010 / Ch. Cao, J. Feng, Zg Tao // Journal of Mountain Science. — 2021. — Vol. 18. — P. 2565–2579. — DOI: 10.1007/s11629-020-6647-5.
14. Внедрение беспилотных летательных аппаратов для оперативного решения научно-производственных задач в условиях Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. — 2020. — № 3. — С. 26–30.
15. Ананенко, Е. В. Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем «отвал — основание» / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 5–21. — DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_5.
16. Методика ведения мониторинга с использованием спутниковых систем и обработки его результатов / Г. М. Кыргызбаева, А. Кенесбаева, Б. Б. Садыков [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. — 2022. — № 1 (117). — С. 52–54.
17. Toward a sound understanding of a large-scale landslide at a mine waste dump, Anshan, China / Sw. Sun, L. Liu, Zx. Yang [et al.] // Landslides. — 2023. — Vol. 20. — P. 2583–2602. — DOI: 10.1007/s10346-023-02136-1.

REFERENCES

1. Ananenko E, Bakhaeva SP. The reason analysis of the overburden rock dumps deformation. E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium. EDP Sciences. 2021;(315):01001. DOI 10.1051/e3sconf/202131501001.
2. Ananenko EV, Bakhaeva SP. Assessment of influence of loads and impacts on stress-strain behavior of natural-technical dump-its foundation system. *Mining information and analytical bulletin*. 2024;(10):5-21. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_5 (In Russ.).
3. Cheskidov VI, Reznik AV. Specifics of internal overburden dumping in open pit mining. *Physical-and-technical problems of mineral development*. 2022;(2): 61-8 (In Russ.).
4. Shpakov PS, Yunakov YuL. Stability of dumps at the Eldorado field. *Mining information and analytical bulletin*. 2018;(6):69-79. — DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-69-79 (In Russ.).
5. Rybin VV, Konstantinov KN, Nagovitsyn OV. The structure of an integrated system for monitoring stability of the open-pit mining facilities by means of digital technologies. *Physical-and-technical problems of mining*. 2021;(4):70-77. DOI: 10.15372/FTPRI20210407 (In Russ.).
6. Kutepov YuI, Kutepova NA, Ponomarenko MR, et al. Geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps in coal mining. *Mining journal*. 2023;(5):69-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.05 (In Russ.).
7. Kretov SI, Ismagilov RI, Badtiev BP, et al. Management of complex stability monitoring of external dumps made up of soils with low bearing capacity and located on weak base for conditions of PJSC «Mikhailovsky GOK». *Mining industry*. 2019;3(145):15-9. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-3-145-15-19. (In Russ.).
8. Kashnikov YA, Musikhin VV, Lyskov IA. Radar interferometry-based determination of ground surface subsidence under mineral mining. *Journal of Mining Science*. 2012;(48):649-55. DOI: 10.1134/S1062739148040089.
9. Safety Manual «Methodological foundations of hazard analysis and accident risk assessment at hazardous production facilities». Moscow, 2022 (In Russ.).

10. Trubetskiy KN. Open-pit mining: handbook. Moscow, 1994 (In Russ.).
11. Demin AM. Stability of open mine workings and dumps. Moscow, 1973 (In Russ.).
12. Cao C, Feng J, Zhang Z, et al. Characteristics and mechanism of dump landslides under compound loads based on physical model test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022;81:350. DOI: 10.1007/s10064-022-02825-6.
13. Cao Ch, Feng JI, Tao Zg. Triggering mechanism and dynamic process of water-rock flow in Nanfen waste dump in 2010. *Journal of Mountain Science*. 2021;(18):2565-79. DOI: 10.1007/s11629-020-6647-5.
14. Ismagilov RI, Zakharov AG, Badtiev BP, et al. Introduction of unmanned aerial vehicles for the operational solution of the scientific and production tasks under conditions of the Mikhailovsky GOK. *Mining industry*. 2020;(3):26-30 (In Russ.).
15. Ananenkov EV, Bakhaeva SP. Deformation development risk analysis and geo-mechanical monitoring for natural and technical 'dump-base' systems. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;(9):5-21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_5 (In Russ.).
16. Kyrgyzbayeva GM, Kenesbayeva A, Sadykov BB. Methodology of monitoring using satellite systems and its results processing. *Surveying and subsoil use*. 2022;1(117):52-4 (In Russ.).
17. Sun Sw, Liu L, Yang Zx, et al. Toward a sound understanding of a large-scale landslide at a mine waste dump, Anshan, China. *Landslides*. 2023;(20):2583-2602. DOI:10.1007/s10346-023-02136-1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Светлана Петровна Бахаева –

доктор техн. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Россия. e-mail: bsp.mdg@kuzstu.ru

Елена Владимировна Ананенко –

аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, Россия. e-mail: ananenkov_ev@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Svetlana P. Bakhaeva –

Dr. Sc. in Engineering, Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: bsp.mdg@kuzstu.ru

Elena V. Ananenkov –

graduate student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: ananenkov_ev@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.10.2024.

Поступила после рецензирования: 18.11.2024.

Принята к публикации: 27.11.2024.

Article info

Received: 30.10.2024.

Revised: 18.11.2024.

Accepted: 27.11.2024.